Panum 极限情况中双重融合深度机制的研究

李华云[1*] 李箐[1] 郝泽奇[1]

[1]（浙江师范大学教师教育学院 金华 321004）

摘 要 Panum 极限情况是单眼性区域中最简单的一种现象，它是研究单眼遮挡区域形成立体视觉机制的突破口。本文对 Panum 极限情况关于深度起源问题存在的争议，展开深入的研究。实验采用固定注视点位置和快速呈现刺激的方式，考察被试是否可以正确知觉注视特征和非注视特征的深度，并考察被试知觉到的深度是否来自深度对比。结果表明，无论是在 Panum 刺激条件下还是在控制刺激条件下，被试都能够正确地知觉到注视特征和非注视特征的深度，且被试在双眼融合后所知觉到的两个特征的深度并非来自深度对比，这说明 Panum 极限情况的深度知觉机制更可能为双重融合。

关键词：立体视觉，单眼性区域，Panum 极限情况，深度对比，双重融合

The study of double fusion depth mechanism in Panum's limiting case

Huayun Li[1*] Jing Li[1] Zeqi Hao[1]

[1](College of Teacher Education, Zhejiang Normal University, Jinhua, 321004, China)

Abstract

Panum's limiting case is one of the simplest configurations in monocular regions, which is the breakthrough in the study of the stereopsis mechanism formed by the monocular occlusion region. This study focuses on the controversy of Panum's limiting case on the origin of depth to carry out further research. The experiment uses a fixation point and quick representation of stimulation to investigate whether the subjects can correctly perceive the depth of fixation features and non-fixation features, and investigate whether the depth perceived by the subjects comes from depth contrast. The results show that the subjects can correctly perceive the depth of fixation features and non-fixation features regardless of Panum's stimulation conditions or controlled stimulation conditions. Besides, the depth of the two features perceived by the subjects in the binocular fusion does not originate from the depth contrast, but from the double fusion. This experimental result suggests that the depth perception mechanism of Panum's limit case is more likely to be double fusion.

Keywords: stereopsis, monocular regions, Panum's limiting case, depth contrast, double fusion

1 引言

立体视觉是一种通过双眼融合，从而达到能够辨识物体远近和前后距离等空间信息的认知过程。双眼视差是立体视觉中非常重要的深度线索，有时也被称为

* 通讯作者：李华云 E-mail: lihuayun99@163.com

立体视差。一般情况下，真实场景中的物体都能在双眼中找到各自的匹配对象，人们可以根据双眼视差来估算出此物体的深度。但是，单眼性区域却是一个例外，它指的是在真实的视觉场景中，对处于前后不同位置上的不透明物体来说，观察者的视线会因为这些物体之间的相互遮挡而受到阻碍，致使某些区域只能被观察者的一只眼睛所看见，而另一只眼睛却看不见。它的特殊之处在于呈现到一只眼中的特征无法在另一只眼中找到相应的匹配对象，因而无法根据双眼视差来估算特征的深度(Cook & Gillam, 2004)，这给立体视觉的研究带来巨大挑战。

Panum 极限情况是单眼性区域中最简单的一种，它是指如果处于前后不同位置上的两个不透明物体均与观察者某一只眼的视线保持在同一水平线上，那么这只眼睛就将完全看不到后面的物体，即此时只有一个特征呈现到观察者的这只眼中，却有两个特征呈现到观察者的另一只眼中，双眼融合后，观察者可以知觉到前后两个物体的深度(Gillam, Blackburn, & Nakayama, 1999; Panum, 1858)。对其深度加工机制，目前主要形成两种对立的观点，即唯一性融合与双重融合。所谓唯一性融合，是指呈现到观察者一只眼中的成对特征，只能有一个与呈现到另一只眼中的单个特征进行匹配，即在观察者知觉到的两个特征的深度中，其中一个特征的深度来自于双眼之间的特征匹配，而另一个特征的深度则来自于其它线索，例如可能来自遮挡、伪装、眼动误差或抑制机制(Bingushi & Yukumatsu, 2005; Frisby, 2001; Howard & Rogers, 2012; Wang, Wu, Ni, & Wang, 2001)。所谓双重融合，是指呈现到一只眼中的成对特征，都与呈现到另一只眼中的单个特征进行了匹配，被试在双眼融合后，所知觉到的结果为两个特征在三维上均具有明显的深度变化(Gillam, 1995)，这种观点认为被试所知觉到的两个特征的深度都来自传统的双眼匹配。

近些年，研究者们基于不同刺激构型的实验研究，得出有关深度加工机制相互对立的结论。具体而言，在小视差下，Panum 直线构型和 Gillam 曲线构型的实验结果都支持双重融合；而对于 Frisby 波线构型及 Wang 斜线构型，却支持唯一性融合。上述三种不同的刺激构型，使双重融合与唯一性融合的争论出现完全对立的局面(Frisby, 2001; Gillam, 1995; Wang et al., 2001)。后来有研究者创立了具有倾斜效应的折线类刺激构型，试图弥合先前采用的刺激构型所存在的缺陷。所谓折线类刺激构型，是指呈现到观察者一只眼中的为一条折线，而呈现到观察者另一只眼中的为两条不同的折线。如果观察者知觉到的特征为两条都具有倾斜效应的折线，那么就可以认为知觉结果为双重融合；而如果观察者知觉到的特征中只有一条折线具有倾斜效应，则可认为知觉结果为唯一性融合。还有研究表明，在单眼性区域形成立体视觉的过程中，双重融合甚至多重融合是常见状态，而唯一性融合不过是其中的一种特殊情形(Li, Xie, Li, & Li, 2011)。

但是，在以往的研究中，有人曾提出质疑，认为在 Panum 极限情况中，被试在双眼融合后所知觉到的两个特征的深度可能并非来自双重融合，而是由深度对比导致的。所谓深度对比（depth contrast），是指呈现到双眼中的某个特征由于双眼视差的存在而产生深度，被试因此也能报告与该特征所相邻的特征的深度，但是，实际上这个相邻的特征处于零平面上，只是由于被试对这两个特征在深度上进行对比，因而能够对这个相邻的特征的深度做出判断(Howard & Rogers, 2012)。由于深度对比效应的存在，有研究者提出，在 Panum 极限情况中，被试在双眼融合后所知觉到的两个特征的前后深度，其中一个特征的深度是由双眼中的特征进行匹配而产生的，而另一个特征的深度是由于深度对比而产生的，并不是来自真正的双眼匹配(EE & Erkelens, 1996; O'Shea, Blackburn, & Ono, 1994)，因此，其

结果并不支持双重融合。

本研究采用快速呈现刺激的方式，使用折线型 Panum 刺激构型，对单眼性区域的深度起源问题展开深入探讨。实验一 A 先对被试对注视特征的深度知觉结果进行研究，并进一步考察被试对非注视特征的深度知觉，以评估在 Panum 极限情况中是否发生双重融合。在理想情况下，应该设计一个实验，同时考察双眼融合后，被试对两个特征的深度知觉。但是，由于本研究中刺激的呈现时间很短，假如被试在刺激消失后需要同时报告两个特征的深度，这样的任务会加重被试的认知负荷，极大可能导致误差的产生。如 Nakayama 和 Shimojo（1990）注意到，在他们的实验中用于测量的视差探针与刺激同时出现，这一方面影响了单眼物体的感知深度，另一方面，刺激和探针的顺序呈现加重了任务的记忆负荷，增加了响应噪声(Nakayama & Shimojo, 1990)。因此，本研究采取实验一 A 和实验一 B，对被试的注视点位置与刺激的呈现时间进行控制，分别考察了被试对注视特征与非注视特征的深度知觉，进一步确定 Panum 极限情况中的深度机制究竟为双重融合还是唯一性融合。

此外，先前研究曾提出，由于深度对比效应的存在，在 Panum 极限情况中，被试在双眼融合后所知觉到的两个特征的前后深度，其中一个特征的深度来自双眼特征匹配，另一个特征的深度则是由于深度对比产生的，而不是真正的双眼匹配，其结果并不支持双重融合。因此，本研究在实验一的基础上设计了实验二以探究 Panum 极限情况下的深度知觉结果是否来自双重融合，以排除之前研究中对深度对比现象的质疑。这两个实验均采用呈现注视点的方式，从而严格控制聚散式眼动使得融合方式不变(Wang et al., 2001)，让被试在自然状态下眼动参与视觉感知的形成过程，但是仍然有可能这种聚散度发生变化而没有引起注意。为了排除这种可能性，以下实验采用在短时间（200 ms）内呈现刺激构型，即快速呈现刺激的方式。在这个前提下，再来考察被试是否还可以知觉到双重融合，并进一步跟先前研究中的结果进行对比。

2 实验一 A ：注视特征的深度知觉

以往研究表明，在小视差下，对于 Panum 极限情况中的折线类刺激构型，被试知觉到双重融合的频率为 90%以上(Li et al., 2011; H. Li et al., 2012)。但是，这些研究并没有考虑到在实验过程中，注视点的位置与刺激的呈现时间是否会对深度的知觉结果产生影响。这就无法确定被试所知觉到的双重融合是否来自同时匹配，因为稳定的快速交替匹配也会产生跟双重融合相同的知觉结果。为此，我们通过实验一 A 和实验一 B，对被试的注视点位置与刺激的呈现时间进行控制，分别考察了被试对注视特征与非注视特征的深度知觉。所谓注视特征与非注视特征是针对被试的注视点是否位于刺激构型中的某一个特征之上而言的，如果被试的注视点位于刺激中的某一个特征之上，那么该特征即为注视特征，相应地，另一个特征为非注视特征。

2.1 研究方法

2.1.1 被试

共 11 名本科生和研究生参与本实验，其中男性 5 名。年龄在 19～28 岁之间，平均年龄为 23.18±2.69 岁。所有被试的单眼视力或矫正视力均在 1.0 以上，无其他精神或器质性病变。他们的立体视锐度（stereoacuity）采用随机点立体图（Randot^{TM} stereotest）进行评估，测试结果需在 20 弧秒以上才能参与本研究。所有观察者在实验开始前均签署了知情同意书，所有的实验内容均符合当地伦理

委员会的审核，并遵循赫尔辛基宣言（Declaration of Helsinki）。

2. 1. 2 实验仪器

本实验采用自主搭建的视觉采集系统对相关的实验数据进行采集。实验中需要电脑（型号：Mac OS X）完成的刺激均采用 MATLAB7.12.0 软件和 PsychToolbox (Brainard, 1997; Pelli, 1997)工具包进行编写。刺激呈现在两个 DELL 彩色显示器上，屏幕分辨率设置为 1920×1200，刷新率为 75Hz。使用惠斯通立体镜（Wheatstone stereoscope）以达到双眼分视的目的。整个实验均在暗室中进行，测试距离为 74cm。在上述分辨率和测试距离的条件下，显示器屏幕上每个像素的视角均为 1.26min。为保证被试的头部与显示器之间的距离在实验中尽量保持不变，要求被试将下巴放在托架上对刺激进行观察，实验任务通过键盘进行按键反应。

2. 1. 3 实验刺激

如图 1 所示，本实验采用了三种类型的刺激，即 Panum 刺激和Ⅰ、Ⅱ类控制刺激。所谓 Panum 刺激，是指它与先前关于 Panum 极限情况的研究中常用刺激的构造原理相同，即呈现到一只眼中的为一个特征，而呈现到另一只眼中的为两个特征。而Ⅰ、Ⅱ类控制刺激与 Panum 刺激不同，它们均为传统的立体视觉刺激，即呈现到双眼中的刺激包含的特征数目相同，因而每个特征都能在双眼视网膜上找到所对应的物体成像。因此，它们的深度可以根据双眼视差进行定量估算，本文称之为“预期深度”。预期深度的结果，不但可与被试实际的深度知觉结果进行比较，进而判断被试对控制刺激的深度知觉是否存在误报等情况，而且，还可以将 Panum 刺激与控制刺激的深度知觉结果进行比较，以此来推测 Panum 刺激中的特征的匹配机制。

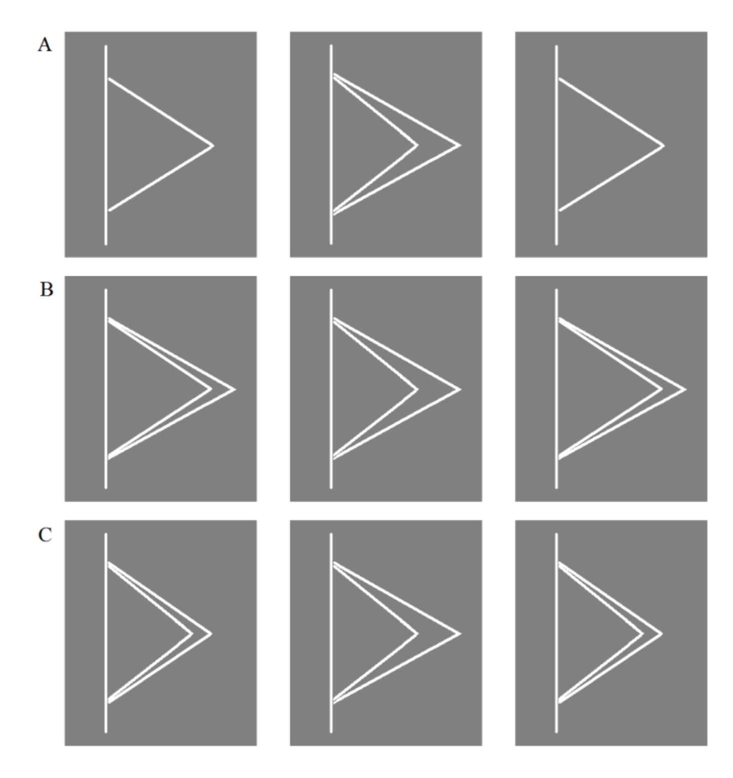


图 1 实验一 A 中所使用的三种刺激类型

图 1 A. Panum 刺激。注视特征指的是在刺激呈现前，折线的顶点位于注视点所在的位置上的特征。B. Ⅰ类控制刺激。其中，小折线为注视特征，刺激呈现前，被试需将注视点停留在小折线的位置上。刺激呈现后，被试需要报告小折线的深度。C. Ⅱ类控制刺激。其中，大折线为注视特征，刺激呈现前，被试将注视点停留在大折线的位置上。刺激呈现时，被试需要报告大折线的深度。

在这三种刺激构型中，均有大折线和小折线之分，在本文中为叙述方便，将离直线较远的折线称为“大折线”，而将离直线较近的折线称为“小折线”。对于 Panum 刺激，将呈现到一只眼中的单个折线称为“单个特征”，而将呈现到另一只眼中的两个折线称为“成对特征”。在 Panum 刺激中，单个特征中折线的顶点与直线之间的视角为 1.5 弧度，而在成对特征中，大折线和小折线的顶点与直线之间的视角分别为 1.8 弧度和 1.2 弧度。因此，双眼融合时，无论单个特征与成对特征中的哪一个折线进行匹配，其双眼视差均为±0.3 弧度。

对Ⅰ类控制刺激来说，大折线的顶点与直线之间的视角均为 1.8 弧度，而小折线的顶点与直线之间的视角在两只眼中分别为 1.2 弧度和 1.5 弧度。因此，双眼融合后，大折线的双眼视差为 0，小折线的双眼视差为±0.3 弧度。对Ⅱ类控制刺激来说，大折线的顶点与直线之间的视角在两只眼中分别为 1.5 弧度和 1.8 弧度，而小折线的顶点与直线之间的视角为 1.2 弧度。因此，双眼融合后，大折线的双眼视差为±0.3 弧度，小折线的双眼视差为 0。

在本研究中，采用双眼视觉中常用的方式将刺激呈现在示意图中(Tsirlin, Wilcox, & Allison, 2011; Wardle & Gillam, 2013)，如图 1 所示，三列刺激表示呈现到左眼或右眼中的刺激，其中第一列和第三列中的刺激完全相同。以 Panum 刺激为例，在一个试次中，假如将第一列中的单个特征呈现到左眼，而将第二列中的成对特征呈现到右眼，在另一个试次中，则会将第二列中的成对特征呈现到左眼，而将第三列中的单个特征呈现到右眼，这样就可以使刺激在左右眼之间进行

调换。

在上述三种刺激中，无论是单个特征还是成对特征，其左侧或右侧都设有一根直线，目的是方便被试更准确地判断特征的深度。此直线的双眼视差为 0，双眼融合后，它刚好处于零平面上，它可以被看作被试判断特征的深度时的参考面。而且，这些刺激均由直线和折线构成，折线和直线的厚度均为 2.5 弧分。在实验过程中，被试的注视点采用直径为 12.6 弧分的红色圆点，用于引导被试将双眼的目光聚焦在指定的位置。刺激呈现的背景颜色均为灰色，密度为 46 cd/ m^2。

2. 1. 4 实验程序

实验流程如图 2 所示，首先，红色注视点呈现在直线的中间，当被试做好准备后按键，注视点随即消失 300 ms。此后，注视点可能出现在小折线的位置上，也可能出现在大折线的位置上，呈现时间为 750 ms。然后刺激呈现 200 ms，这些刺激为图 1 中所示的 Panum 刺激、I 类或 II 类控制刺激中的任何一种。折线可能位于直线的左侧，也可能位于直线的右侧。在反应阶段，被试的任务是报告相对于直线所在的零平面来说，位于注视点位置上的折线所在的平面的深度是向远处还是向近处倾斜。每个试次结束后，被试都需要将注意力重新集中到直线中间的红色注视点上准备下一个试次。

在整个实验过程中，被试都需要控制自己的目光，让其集中在红色注视点所在的位置。并且，在注视点消失到注视点重新出现期间，被试仍需要将目光停留在先前注视点所提示的位置上。例如：在刺激呈现前，注视点出现在大折线的位置上，之后在刺激呈现的过程中，虽然注视点已消失，但被试仍需要将目光停留在大折线的位置。对于多数被试来说，在刺激呈现时，将其目光仍停留在之前注视点所提示的位置上并不困难，但是，在刺激消失后，他们可能无法确定位于注视点位置上的到底是大折线还是小折线，因而很难确定需要对哪个折线的深度做出判断。因此，为有助于被试更容易地确定哪个折线是注视特征，当注视点位于小折线的顶点时，采用空心红点作为注视点，当注视点位于大折线的顶点时，采用实心红点作为注视点。

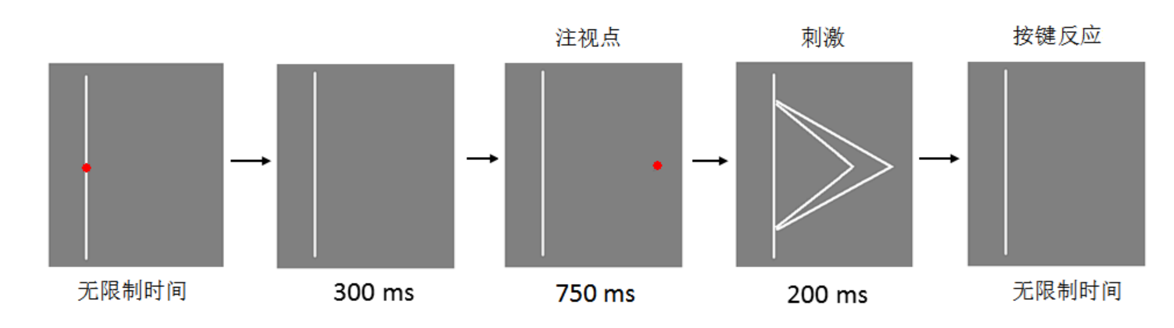


图 2 实验一 A 的流程图

对于图 1 所示的三类刺激，在实验过程中，注视点可能出现在小折线或大折线的顶点上，折线的朝向可能在直线的左侧或右侧，且呈现到左右眼中的刺激在不同试次中进行了调换。因此，Panum 刺激共包含 8 种刺激，I 和 II 类控制刺激也都包含 8 种刺激，这两类控制刺激合并后共有 16 种控制刺激。在正式实验开始前，被试不仅要参加一些立体视觉研究方面的相关测试，还要参加与正式实验流程相同的预实验，满足要求后才能参与正式实验。正式实验包括 2 个 block，被试可在两个 block 之间进行休息。在每个 block 中，每种 Panum 刺激（共 8 种）随机呈现 10 次，每种控制刺激（共 16 种）随时呈现 5 次，因此，每个 block 包

含 160 个试次，而整个实验共包括 320 个试次。

2.2 结果

由于呈现到两眼中的刺激在左右眼之间的差异并不是本研究所关注的问题，因此，本研究将这两种条件下的结果进行了合并。此外，设置Ⅰ类和Ⅱ类控制刺激只是为了避免被试误报，且分别用这两类刺激来考察大折线和小折线在传统刺激中的深度知觉，以便与 Panum 刺激进行对比，而Ⅰ类和Ⅱ类控制刺激之间的差异对本研究并没有意义，因此，在数据分析时，将Ⅰ类和Ⅱ类刺激的结果合并为控制刺激的结果。最后用于统计分析的是 Panum 刺激和控制刺激在四种实验条件下的结果，即注视特征是大折线还是小折线，折线的朝向位于直线的左侧还是右侧。

然后，在这四种实验条件下，分别计算出在 Panum 刺激和控制刺激中，被试对注视特征的深度知觉与预期深度相同的概率，以下统称为“一致概率”。所谓预期深度，对 Panum 刺激来说，指的是呈现到一只眼中的单个特征与呈现到另一只眼中的注视特征进行匹配后，根据双眼视差估算出来的深度；而对控制刺激来说，指的是注视折线跟另一只眼中所对应的折线进行匹配后，根据双眼视差所估算出的深度。

采用 SPSS 17.0 进行统计分析，对一致概率进行 2（注视特征：小折线、大折线）× 2（刺激类型：Panum 刺激、控制刺激）× 2（折线朝向：位于直线的左侧、位于直线的右侧）三因素重复测量方差分析。方差分析的 p 值采用 Greenhouse Geisser 法校正，成对比较用 Bonferroni 进行校正。

方差分析的结果发现，刺激类型的主效应显著，$F(1, 10) = 13.81$，$p < 0.01$，$\eta_p^2 = 0.58$。事后比较结果表明，Panum 刺激的一致概率显著低于控制刺激。而且，注视特征和刺激类型之间的交互作用也显著，$F(1, 10) = 9.54$，$p < 0.01$，$\eta_p^2 = 0.49$。简单效应分析发现，当注视特征为小折线时，Panum 刺激的一致概率显著低于控制刺激，$p < 0.01$，但注视特征为大折线时，Panum 刺激的一致概率与控制刺激之间不存在显著差异，$p > 0.05$。其他主效应和交互作用都不显著，$p > 0.05$。

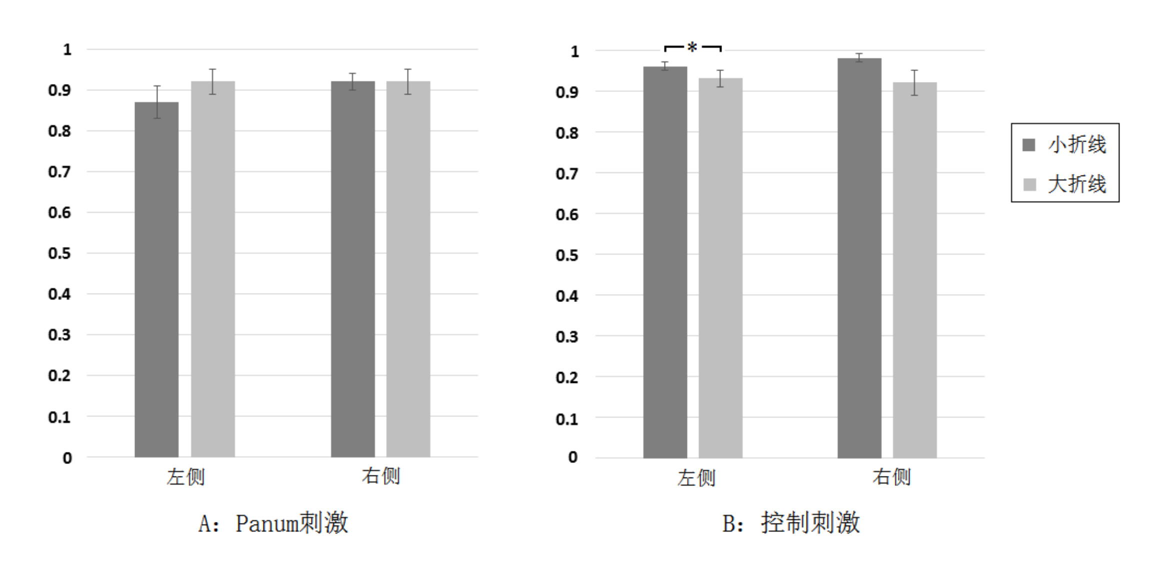


图 3 注视特征的实验结果

如上图所示，纵坐标表示与预期结果一致的概率。横坐标表示在 Panum 刺激和控制刺激中，四种实验条件下的实验结果。纵坐标表示被试知觉到的深度与预期深度之间的一致概率。深灰色和浅灰色的矩形柱分别表示注视特征为小折线和大折线的结果。

从图 3 中可以看出：1）在 Panum 刺激的四种实验条件下，被试的所知觉到的深度与预期深度之间的一致概率均接近 90%；2）在控制刺激的四种实验条件下，被试的所知觉到的深度与预期深度之间的一致概率均高达 90%以上。

除方差分析外，实验一 A 还将各种实验条件下的一致概率与随机概率作了配对样本 t 检验分析，结果表明，所有实验条件下的一致概率均显著高于随机概率。所谓随机概率是指每一种知觉结果在全部知觉结果中所占的百分比，对实验一 A 来说，被试的深度知觉结果只有两种选择，即注视特征所在的平面的深度是向远处还是向近处倾斜，因此，知觉结果的随机概率为 50%。

3 实验一 B：非注视特征的深度知觉

在实验一 A 中，基于先前的研究结果(H. Li et al., 2012)，我们有理由认为被试可以判断出注视特征的深度，因此，深度知觉结果仅给被试提供了两种选择。但是，在实验一 B 中，被试的注视点在刺激呈现过程中还需要继续停留在注视特征上，而刺激呈现结束后，被试却需要报告非注视特征的深度。这有可能导致 Panum 刺激中呈现到一只眼中的单个特征跟呈现到另一只眼中的注视特征进行匹配，而并没有跟呈现到另一只眼中的非注视特征进行匹配，或者由于被试没有有意识注意非注视特征的深度，以至于被试可能知觉到非注视特征的深度处于零平面上。因此，为了确保被试能准确报告自己的知觉结果，实验一 B 提供了三种知觉结果供被试做出选择，即非注视特征所在的平面的深度是向远处、向近处倾斜还是处于零平面上。

3.1 研究方法

本实验中的被试和实验仪器跟实验一 A 相同。所使用的刺激跟实验一 A 类似，也包括 Panum 刺激和Ⅰ、Ⅱ类控制刺激，不同之处在于，在实验一 A 中，注视特征的双眼视差是±0.3 弧度，非注视特征的双眼视差是 0 弧度，而在实验一 B 中，非注视特征的双眼视差是±0.3 弧度，注视特征的双眼视差是 0 弧度。另外，实验流程与实验一 A 的不同之处在于，在实验一 B 中，被试需要在刺激呈现时，将目光仍停留在之前注视点出现的位置，而在刺激消失后，被试却需要报告非注视特征的深度知觉结果是远、近还是位于零平面上。

下面以实验一 A 中的Ⅰ类控制刺激为例（图 4），具体说明实验一 A 和实验一 B 在注视点位置等方面的差异。对于此刺激，在实验一 A 中，考察的是注视特征的深度知觉，小折线为注视特征，其双眼视差为±0.3 弧度，大折线为非注视特征，其双眼视差为 0 弧度。刺激呈现前和刺激呈现过程中，被试都需将注视点停留在小折线的位置上。刺激呈现后，被试需要报告小折线的深度。而在实验一 B 中，考察的是非注视特征的深度，此时小折线为非注视特征，其双眼视差为±0.3 弧度，大折线为注视特征，其双眼视差为 0 弧度。刺激呈现前和呈现过程中，被试都将注视点停留在大折线的位置上。刺激呈现后，被试却需要报告小折线的深度。由此可见，由于实验一 A 和实验一 B 的目的不同，对于相同的刺激，被试的任务也相同，但注视点的位置在这两个实验的过程中存在差异。

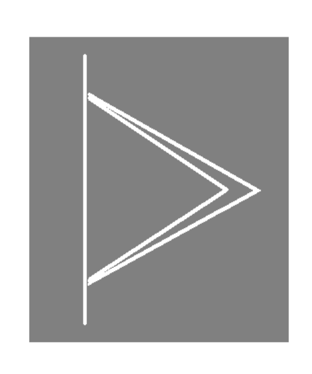
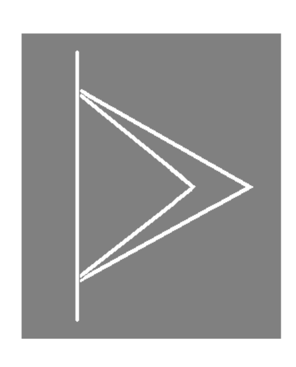
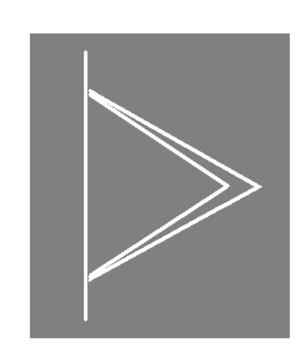




图 4 实验一 A 中的Ⅰ类控制刺激

3.2 结果

基于与实验一 A 相同的原因，针对实验一 B 的数据结果，将呈现到双眼中的刺激（包括 Panum 刺激和Ⅰ、Ⅱ类控制刺激）在不同试次上调换的结果，以及Ⅰ、Ⅱ类控制刺激的结果分别进行了合并。此外，根据实验一 A 的结果可知，折线朝向的主效应并不显著，说明不论折线位于直线的左侧还是右侧，被试在注视特征中所深度的知觉与预期深度之间的一致概率不存在明显差异，因此，对折线位于直线左、右两侧的实验结果也进行了合并。在对实验数据进行上述处理之后，分别计算出每个被试在 Panum 刺激和控制刺激条件下，当非注视特征为小折线和大折线时，被试知觉到的深度与预期深度之间的一致概率（简称为“一致概率”），以及被试所知觉到的深度处于零平面上的概率（简称为“零视差的概率”）。

采用 SPSS17.0 对实验数据进行统计分析，并对一致概率和零视差的概率分别进行 2（非注视特征：大折线、小折线）× 2（刺激类型：Panum 刺激、控制刺激）的两因素重复测量方差分析，方差分析的 p 值采用 Greenhouse Geisser 法校正，成对比较采用 Bonferroni 进行校正。

如图 5 中的 A 图所示，对一致概率来说，方差分析的结果显示：1）非注视特征的主效应显著，$F(1, 10) = 5.411$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.351$，这表明非注视特

征是大折线还是小折线之间的一致概率存在显著差异。具体来说，相比于非注视特征为大折线，非注视特征为小折线时被试所知觉到的深度与预期深度之间的一致概率显著偏低；2）刺激类型的主效应也显著，$F(1, 10) = 6.413$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.391$，这表明刺激类型也是影响一致概率的重要因素，事后比较结果表明，Panum 刺激条件下的一致概率较控制刺激显著偏低；3）非注视特征与刺激类型之间的交互作用不显著，$p > 0.05$。

如图 5 中的 B 图所示，对零视差的概率来说，方差分析的结果显示：1）非注视特征的主效应显著，$F(1,10) = 6.01$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.38$，这表明非注视特征是大折线还是小折线的零视差概率存在显著差异。具体来说，当非注视特征为小折线时，被试所知觉到的深度为零视差的概率较非注视特征为大折线时显著偏高；2）刺激类型的主效应不显著，$p > 0.05$；3）非注视特征与刺激类型这两个因素之间的交互作用显著，$F(1,10) = 7.26$，$p < 0.05$，$\eta_p^2 = 0.42$，进一步的简单效应分析结果表明，在 Panum 刺激条件下，当非注视特征为小折线时，被试的所知觉到的深度为零视差的概率较非注视特征为大折线时显著偏高，$p < 0.01$；在控制刺激条件下，当非注视特征为小折线时，被试的所知觉到的深度为零视差概率较非注视特征为大折线时也有明显的差异，$p < 0.05$。

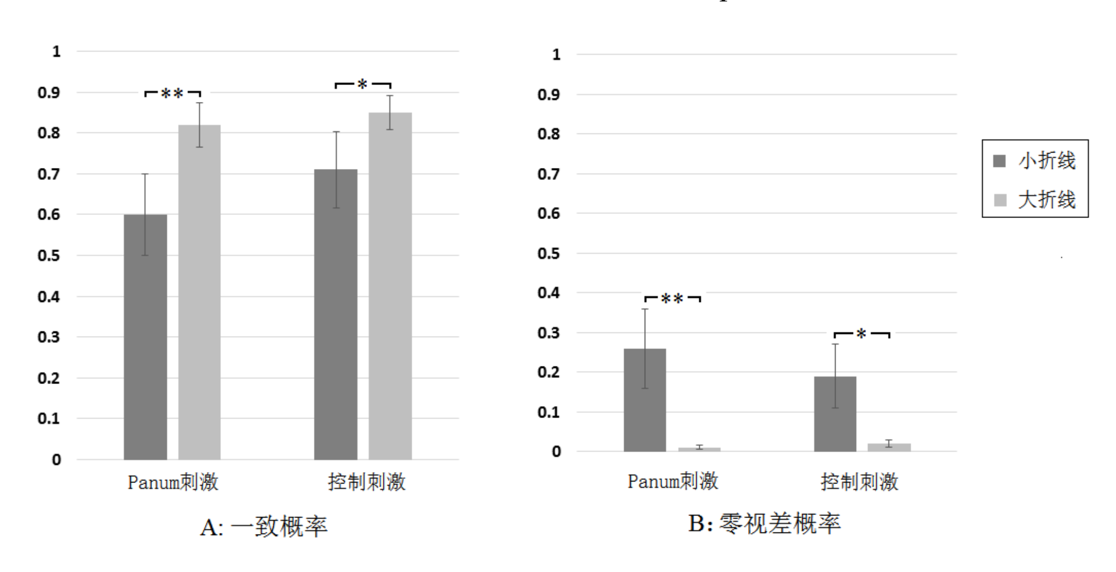


图 5 非注视特征的深度知觉结果

A. 一致概率的结果。纵坐标表示被试所知觉到的深度与预期深度之间的一致概率。B. 零视差概率的结果，即被试知觉到位于零平面上的概率。一致概率和零视差概率的结果均包含四种实验条件，即 Panum 刺激或控制刺激，以及非注视特征为小折线或大折线。**代表 $p < 0.01$，*代表 $p < 0.05$。

除方差分析外，实验一 B 还将各种实验条件下的一致概率和零视差概率分别与随机概率作了配对样本 t 检验分析，结果表明：1）在所有实验条件下，一致概率均显著高于随机概率，$p < 0.05$。所谓随机概率是指每一种知觉结果在全部知觉结果中所占的百分比，对实验一 B 来说，被试只有三种知觉结果，因此，每一种结果的随机概率均为 33.3%；2）不论是 Panum 刺激还是控制刺激，当非注视特征为小折线时，零视差概率与随机概率之间存在显著差异，$p < 0.05$；但当非注视特征为大折线时，零视差概率显著低于随机概率，$p < 0.01$。

4 实验二 被试的知觉结果与深度对比的关系

上述两个实验的研究结果表明，不论对于注视特征还是非注视特征，对折线类的 Panum 刺激构型而言，双眼融合后，被试可以知觉到两个特征所在的平面都有深度，这支持了双重融合的结果。但多数反对双重融合的研究者认为，注视特征的深度来自特征匹配，而非注视特征的深度来自其他线索。因此，在 Panum 极限情况中，质疑被试的深度知觉结果来自深度对比的观点，主要是针对非注视特征而言的。

针对上述观点,我们设计了实验二，旨在验证在 Panum 极限情况中，被试的深度知觉结果是否来自深度对比。我们假设双眼融合后，如果 Panum 刺激中的一个特征的深度确实来自深度对比，那么，这个特征的深度会受到另一个特征的影响，一旦另一个通过双眼视差而产生深度的特征消失后，被试将会知觉到这个特征的深度会发生改变。并采用如下的设计思路：如果非注视特征的深度知觉确实是来自深度对比，那么当注视特征消失后，被试将知觉到非注视特征的深度发生改变；反之，如果非注视特征的深度知觉来自于双重融合，那么当注视特征消失后，被试将感知到非注视特征的深度没有发生任何改变。为此，在整个实验二的过程中，被试都需要在注视特征消失后，报告 Panum 刺激中非注视特征的深度是否发生改变。

4. 1 研究方法

4. 1. 1 被试

除了 1 名被试因故没有参加外，其余 10 名被试均与实验一 A 相同，其中男性 5 名，女性 5 名，年龄在 19～26 岁之间，平均年龄为 22.70±2.33 岁。

4. 1. 2 实验仪器

与实验一 A 相同。

4. 1. 3 实验刺激

实验所用的刺激包括三种类型，即 Panum 刺激和Ⅰ、Ⅱ类控制刺激。在这三类刺激中，折线可能位于直线的左侧，也可能位于直线的右侧；在不同的试次中，对呈现到左右眼中的刺激进行了调换。因此，上述三类刺激都包含 4 种条件。此外，为避免对被试的判断造成干扰，本实验将大折线当作注视特征，把小折线当作非注视特征。在呈现到左右眼的两张图像中，两个红色游标分别位于大折线的顶点的上部和下部（如图 6 所示），这两个游标主要是用来控制辐辏(Gillam et al., 1999; Wang et al., 2001)。因而在实验过程中，一只眼仅见上游标，而另一只眼仅见下游标。

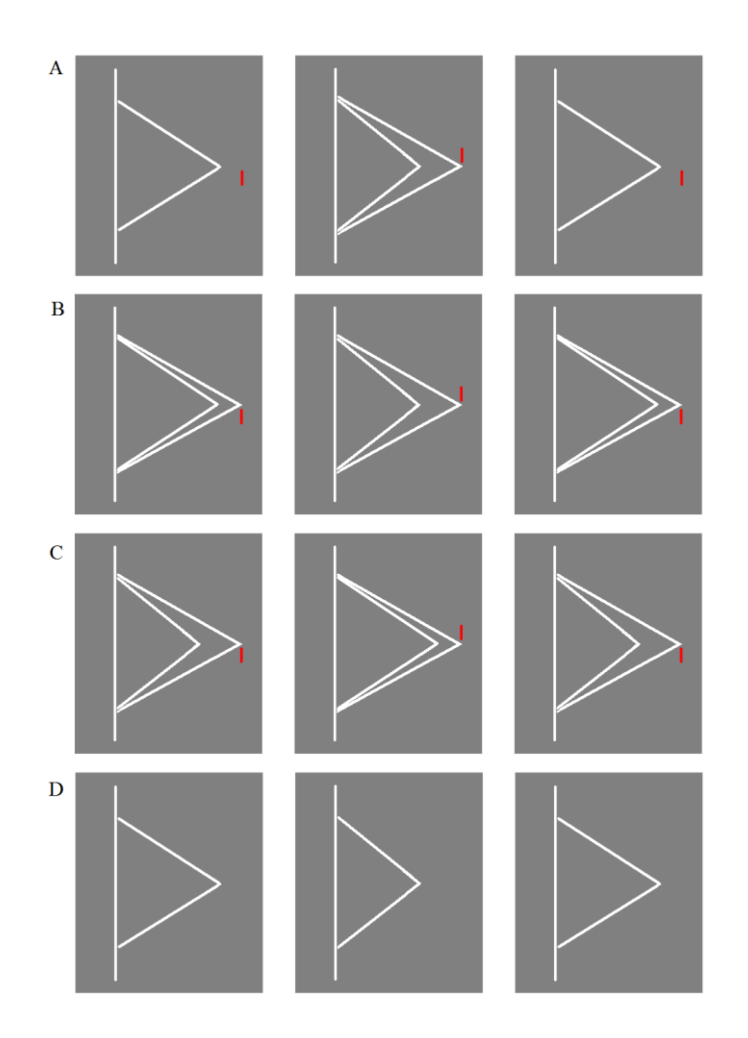


图 6 实验二中所使用的刺激

图 6 A. Panum 刺激。B. Ⅰ类控制刺激。对于此类刺激，当大折线消失后，将呈现图 6D 中的刺激，被试理应报告小折线的深度没有发生改变。C. Ⅱ类控制刺激。当大折线消失后，被试理应报告小折线的深度发生了改变。D. 注视特征（即大折线）消失后所呈现的刺激。

如图 6B 和 6C 所示，在Ⅰ、Ⅱ两类控制刺激中，大折线和小折线在双眼视网膜上都有确定的对应物体图像。在这两类刺激中，大折线始终都是注视特征，其双眼视差为零，而小折线的双眼视差存在差异。下面叙述时，均以第一列中的图像呈现到左眼和第二列的图像呈现到右眼为例，具体来说，在Ⅰ类控制刺激条件下，非注视特征（即小折线）的双眼视差为+0.3 弧度，当注视特征（即大折线）消失后，所呈现的刺激如图 6D 中所示，此时小折线的双眼视差仍为+0.3 弧度。而在Ⅱ类控制刺激条件下，非注视特征（即小折线）的双眼视差为−0.3 弧度，当注视特征（即大折线）消失后，所呈现的仍是图 6D 中的刺激，此时小折线的双眼视差变为+0.3 弧度。根据双眼视差加工机制，对于图 6B 中的刺激，当大折线消失后，被试应该报告小折线的深度没有发生改变；而对于图 6C 中的刺激而言，当大折线消失后，被试应该报告小折线的深度发生了改变。

4.1.4 实验程序

实验流程如图 7 所示，在每个试次中，先呈现带有红色注视点的直线 300 ms。然后，在直线的一侧出现两个红色游标，其呈现时间不受限制，当被试能够将两

个红色游标在上下位置对齐后，开始按空格键，随即刺激呈现 200 ms。随后，大折线消失，此时，被试仍需要将目光停留在大折线所在的位置上，不要尝试转移目光去观察小折线。之后，只包含小折线的刺激呈现 100 ms，最后，被试需要通过按键来报告小折线的深度是否发生改变。按键结束后，红色注视点重新出现在直线的中间，被试还需要将目光重新回到带有红色注视点的直线上，以便开始下一个试次。

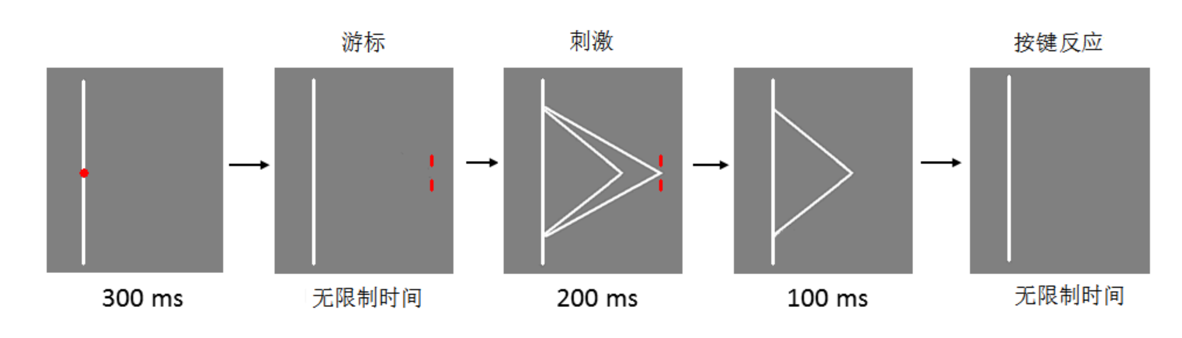


图 7 实验二的流程图

本实验分为练习实验与 2 个 block 的正式实验。对于练习实验，每种实验条件下的刺激均随机呈现两次。在每个 block 中，Panum 刺激中的 4 种实验条件随机呈现 10 次，Ⅰ类和Ⅱ类控制刺激中的 8 种实验条件也随机呈现 10 次，因此，每个 block 共包括 120 个试次。被试可以在两个 block 之间进行休息，整个实验共包括 240 个试次。

4. 2 结果

对 Panum 刺激和Ⅰ、Ⅱ类控制刺激来说，当折线位于直线的左侧或右侧时，被试的深度知觉结果没有显著差异，因此，在处理数据结果时，将这两种实验条件下的结果进行了合并。此外，基于与实验一 A 相同的原因，对呈现到左右眼中的刺激进行调换的结果也进行了合并，最终的实验结果如图 8 所示。

对于被试报告小折线的深度不发生改变的概率的结果，采用 SPSS17.0 对其进行单因素被试内方差分析。结果显示，这三种实验条件的主效应显著，$F(1, 10) = 515.89$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.98$。事后比较结果表明，对于 Panum 类刺激，当大折线消失后，被试报告小折线的深度不发生改变的概率略微低于Ⅰ类控制刺激。但是，Panum 刺激和Ⅱ类控制刺激之间存在显著差异，$p < 0.001$。当大折线消失后，相对于Ⅱ类控制刺激，被试在 Panum 刺激中报告小折线的深度不发生改变的概率显著偏高。这些结果表明，Panum 刺激与Ⅱ类控制刺激之间存在显著差异，相对于Ⅱ类控制刺激，Panum 刺激跟Ⅰ类控制刺激更接近。

图 8 实验二的结果图

如上图所示，横坐标表示刺激类型，纵坐标表示在 Panum 刺激和Ⅰ、Ⅱ类刺激条件下，当大折线消失后，被试报告小折线的深度不发生改变的概率。

从图 8 中可以看出：在 Panum 刺激条件下，当注视特征消失后，被试对非注视特征的知觉深度不发生改变的概率高达 90%以上。这表明被试对非注视特征的知觉深度并非来自深度对比，即被试在 Panum 极限情况中所知觉到的深度并非来自深度对比。

5 讨论

对先前的研究进行分析，可以看出，对于单眼性区域的深度起源问题，一直存在支持和反对双重融合的两种完全对立的观点(Kumar, 1996; Ono, Shimono, & Shibuta, 1992)。因此，在本研究中我们采用具有倾斜效应且有明确判据的折线类 Panum 刺激，通过实验验证 Panum 刺激中的深度知觉结果是来自双重融合还是唯一性融合。

5. 1 Panum 刺激中的深度知觉结果支持双重融合

实验一 A 的结果表明无论是在 Panum 刺激条件下还是在控制刺激条件下，被试都能够正确知觉到注视特征的深度。实验一 B 的结果表明无论是在 Panum 刺激条件下还是在控制刺激条件下，被试对非注视特征所知觉到的深度与预期深度之间的一致概率均显著高于随机概率，这说明被试能够正确地知觉到非注视特征的深度。再结合实验一 A 的研究结果，可以看出，无论是在 Panum 刺激条件下还是在控制刺激条件下，被试能够知觉到注视特征和非注视特征的深度。上述两个实验的研究结果表明，不论对于注视特征还是非注视特征，对折线类的 Panum 刺激构型而言，双眼融合后，被试可以知觉到两个特征所在的平面都有深度，这支持了双重融合的观点。

此外，对实验一 A 和实验一 B 的结果进行比较和分析后，仍可发现一些值得探讨的问题。首先，对一致概率来说，刺激类型的主效应都显著，Panum 刺激

条件下的一致概率显著低于控制刺激，这表明相对于控制刺激，被试在 Panum 刺激中知觉到注视特征和非注视特征的深度的难度更大。其原因可能是在控制刺激中，呈现到双眼中的刺激均包含两个特征，这两个特征都能在双眼中找到确定的对应特征而进行匹配，而在 Panum 刺激中，呈现到一只眼中的单个特征，究竟与呈现到另一只眼中的成对特征中的哪一个进行匹配是不确定的，因此，这种匹配的不确定性导致被试更难知觉到特征的深度。

其次，如图 3 和 5 所示，无论是在 Panum 刺激条件下还是在控制刺激条件下，相比于注视特征，非注视特征的一致概率显著偏低，这表明被试更难知觉到非注视特征的深度。造成这个结果的原因在于，对于注视特征，在刺激呈现时，被试需要将注视点放在此特征上，并在刺激消失后对此特征的深度进行报告。而对于非注视特征，在刺激呈现的过程中，被试仍需要将目光停留在注视特征所在的位置上，而刺激消失后，被试却需要对非注视特征的深度做出判断。在严格控制注视点的情况下，被试只能在无意识的状态下，凭感觉和猜测对非注视特征的深度做出报告，从而增加了被试对其深度做出正确判断的难度。

最后，不论对于 Panum 刺激还是控制刺激，注视特征为小折线时的一致概率显著低于注视特征为大折线时，这表明相对于大折线，被试更难知觉到小折线的深度。这可能是由于刺激的视差梯度导致的，尽管在刺激中，小折线和大折线的高度相同，但它们在水平方向上的宽度存在差异，这导致了两个折线的水平视差梯度不同。在立体视觉中，双眼融合不仅受到视差的限制，还会受到视差梯度的影响，视差梯度越大，双眼融合的难度越大(Brookes & Stevens, 1989)。相对于大折线，小折线的水平视差梯度更大，因而导致被试更难知觉到小折线的深度。

5.2 非注视特征的深度并非来自深度对比

在遮挡构型中，尽管先前研究者也经常发现双重融合的现象(Harris & Wilcox, 2009)，但是，这种知觉结果有时还是会受到质疑。例如：先前曾有研究者设计出一种 Panum 极限情况的变式，并提出被试可以知觉到呈现到一只眼中的单个特征跟呈现到另一只眼中的两个特征都发生融合，即支持双重融合的观点。之后，Gillam 等人（1999）采用与先前研究中类似的刺激构型，将一个直线呈现到一只眼中，另两个交叉倾斜的直线呈现到另一只眼中，实验结果也支持 Panum 极限情况中的深度来自双重融合(Gillam et al., 1999)。然而，后来却有研究者指出这种知觉结果也可能是由深度对比导致的，这使双重融合的观点在一定程度上受到了一些挑战。所谓深度对比是指一个特征本身并无深度，但由于相邻的特征存在深度，而使这个特征在深度的反方向上具有深度(Howard & Rogers, 2012)。迄今为止，研究者仍不能确定双重融合的知觉结果是否来自深度对比。

对于 Panum 刺激中的注视特征，先前研究已普遍认为它的深度来自特征匹配，因此，这种质疑主要是针对 Panum 刺激中的非注视特征而言的。在实验一 A 和实验一 B 中，研究结果已表明，在 Panum 刺激中，不论对于注视特征还是非注视特征，被试都能够正确知觉到它们的深度。在此基础上，实验二的结果表明在 Panum 刺激条件下，当注视特征消失后，被试对非注视特征的知觉深度不发生改变的概率高达 90%以上。这表明被试对非注视特征的知觉深度并非来自于深度对比，即被试在 Panum 极限情况中所知觉到的深度并非由深度对比产生。这否定了先前研究中曾质疑被试的知觉深度结果来自深度对比的观点，并提供了新的证据支持 Panum 极限情况中的深度起源于双重融合。

5.3 折线类 Panum 刺激构型的优势

在先前的研究中，不同的研究者使用不同的刺激构型得出了不同的结论，如 Panum 直线构型和 Gillam 曲线构型的实验结果都支持双重融合；而对于 Frisby 波线构型及 Wang 斜线构型，却支持唯一性融合。研究者们在使用不同的刺激构型时可能也引入了一些干扰因素，导致被试的知觉结果不准确和不稳定。而本文所使用的折线类刺激构型与其它常用的刺激构型相比具有很多优越性，它能够兼顾知觉结果的准确性和稳定性(Gettys & Harker, 1967)。

具体来说，对立体视觉而言，在呈现到双眼之中的特征数目不等的情况下，如果各特征之间的差异越小，那么观察者的知觉结果就越稳定，双眼融合时就越不容易受到复视或双眼竞争等其它因素的影响。然而，特征之间的差异越小，观察者就越难以对由双重融合引起的知觉结果之间的区别做出判断，甚至会出现模棱两可或似是而非的情况，从而影响知觉结果的准确性。但对折线类刺激构型来说，上述问题基本可以得到很好的解决，由于折线平面的倾斜是可以独立感知的立体效果，因此可以用作判断融合是否直接发生的标准(Lee & Dobbins, 2002; 王志宏, 吴新年, 倪睿, & 汪云九, 2001)，而且由于呈现到双眼中之折线的物理属性基本类似，这在一定程度上可使被试的知觉结果更加稳定(Li et al., 2011)。

6 结论

本研究采用倾斜效应且有明确判据的折线类 Panum 刺激，对 Panum 极限情况中双重融合的深度机制进行研究，实验结果表明 Panum 极限情况中的深度知觉机制为双重融合，即被试既能正确地知觉到注视特征的深度，也能正确地知觉到非注视特征的深度，且被试的深度知觉结果并非来自于深度对比，而是来自于双重融合。这解决了先前研究中所存在的争议，为建立新的立体匹配模型提供了理论依据。

参考文献

[1] Bingushi, K., & Yukumatsu, S. (2005). Disappearance of a monocular image in Panum's limiting case. *Japanese Psychological Research, 47*(3), 223-229.

[2] Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox. *Spatial Vision, 10*(4), 433-436.

[3] Brookes, A., & Stevens, K. A. (1989). The Analogy between Stereo Depth and Brightness. *Perception, 18*(5).

[4] Cook, M., & Gillam, B. (2004). Depth of monocular elements in a binocular scene: the conditions for da Vinci stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 30*(1), 92.

[5] EE, R. v., & Erkelens, C. J. (1996). Anisotropy in Werner's Binocular Depth-contrast Effect. *Vision research, 36*(15).

[6] Frisby, J. P. (2001). Limited understanding of Panum' s limiting case. *Perception, 30*(9), 1151-1152.

[7] Gettys, C. F., & Harker, G. S. (1967). Some observations and measurements of the Panum phenomenon. *Perception & psychophysics, 2*(9), 387-395.

[8] Gillam, B. (1995). Matching needed for stereopsis.

[9] Gillam, B., Blackburn, S., & Nakayama, K. (1999). Stereopsis based on monocular gaps: metrical encoding of depth and slant without matching contours. *Vision research, 39*(3), 493.

[10] Harris, & Wilcox. (2009). The role of monocularly visible regions in depth and surface perception. *Vision Research, 49*(22), 2666-2685.

[11] Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2012). *Perceiving in Depth. Volume 2, Stereoscopic vision.* Oxford: Oxford University Press.

[12] Kumar, T. (1996). Multiple matching of features in simple stereograms. *Vision research, 36*(5).

[13] Lee, H. S., & Dobbins, A. C. (2002). Stereo fusional limit and Panum's limiting case revisited using dichoptic color fusion. *Journal of vision, 2*(7), 321-321.

[14] Li, Xie, Y., Li, Y., & Li, S. (2011). *Slant effects in fold-line Wheatstone-Panum limiting case-A solid evidence for double matching.* Paper presented at the Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on IEEE.

[15] Li, H., Xie, Y., Li, S., Xie, S., Gao, C., & Yang, Z. (2012). The effects of vertical gradient of disparity and combination mode of features on the occurrence of double fusion in Panum's limiting case. *Perception, 41*(11), 1299-1314.

[16] Nakayama, K., & Shimojo, S. (1990). Da vinci stereopsis: Depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research, 30*(11), 1811-1825.

[17] O'Shea, R. P., Blackburn, S. G., & Ono, H. (1994). Contrast as a depth cue. *Vision Research, 34*(12), 1595-1604.

[18] Ono, H., Shimono, K., & Shibuta, K. (1992). Occlusion as a depth cue in the Wheaststone-Panum limiting case. *Perception & psychophysics, 51*(1), 3-13.

[19] Panum, P. L. (1858). Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. *Kiel: Schwerssche Buchhandlung.*

[20] Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psycho- physics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision, 10*, 437-442.

[21] Tsirlin, I., Wilcox, L. M., & Allison, R. S. (2011). Disparity biasing in depth from monocular occlusions. *Vision Research, 51*(14), 1699.

[22] Wang, Z., Wu, X., Ni, R., & Wang, Y. (2001). Double fusion does not occur in Panum's limiting case: evidence from orientation disparity. *Perception, 30*(9), 1143-1149.

[23] Wardle, S. G., & Gillam, B. J. (2013). Phantom surfaces in da Vinci stereopsis. *Journal of Vision, 13*(2).

[24] 王志宏, 吴新年, 倪睿, & 汪云九. (2001). Binocular fusion in Panum's limiting case of stereopsis obeys the uniqueness constraint. *Science in China(Series C:Life Sciences)*(01), 40-48.

（通讯作者：李华云 E-mail: lihuayun99@163.com）